4. Open-cell ceramic foam filters for melt filtration: Processing, characterization, improvement and application / Y. Dai, C. Voigt, E. Storti [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 32. – P. 3402–3422. – DOI 10.1016/j.jmrt.2024.08.167

# УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ЛОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СОСТАВА И СВОЙСТВ

**С. С. Колесник**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Исследование посвящено минимизации тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах, где 20–25 % энергии теряется с отходящими газами. Предложена концепция интеллектуальной системы адаптивного подогрева шихты, интегрирующая методы компьютерного зрения, анализаза волновой (звуковой) проницаемости шихты и цифровых двойников на базе моделирования. Алгоритм управления в реальном времени картирует морфологию лома, вычисляя параметры пористости и эквивалентного диаметра для прецизионной настройки тепловых потоков. Промышленное внедрение позволит обеспечить снижение угара металла в 2–3 раза, экономию природного газа на подогрев на 10–15 % и рост средней температуры подогрева лома на 150–200 °С.*

**Ключевые слова:** ДСП, подогрев лома, цифровой двойник, Industry 4.0, энергоэффективность, моделирование, рециклинг.

Электросталеплавильное производство обеспечивает около 28 % мирового выпуска стали, при этом основным потребителем электрической энергии в цикле плавки является период расплавления металлической завалки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В структуре энергетического баланса современных ДСП суммарное потребление тепла составляет 640–680 кВт · ч/т, из которых 340–360 кВт · ч/т генерируется за счет электрической дуги, остальное – экзотермические реакции и тепло от работы топливно-кислородных горелок [1]. Потери с отходящими газами при этом достигают 143–205 кВт · ч/т (22–32 %), а температура газового потока на выходе из рабочего пространства составляет 1000–1200 °С [2, 3].

Технология предварительного подогрева шихты (ВПШ) представляет собой наиболее результативный из известных методов интенсификации ДСП-процесса: по данным сравнительного анализа ее вклад в снижение удельного расхода электроэнергии достигает 20–22 % от суммарного потенциала технологических мероприятий, тогда как применение топливно-кислородных горелок обеспечивает 12 %, вдувание кислорода в ванну – 10 %, использование жидкого чугуна – 10 % [1, 4]. Эмпирически установлено, что каждые 100 °С нагрева лома обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии на 13–15 кВт · ч/т [3, 5]. Вместе с тем практическая реализация высокотемпературного ВПШ (свыше 500–600 °С) сдерживается интенсивным окислением железа и образованием полихлорированных дибензодиоксинов и фуранов при термическом разложении органических загрязнений лома [6]. Среднетемпературный диапазон 300–500 °С признается оптимальным компромиссом, обеспечивающим значимый энергетический эффект при ограниченных экологических рисках и потерях металла от угара [5, 6].

Ключевым сдерживающим фактором для достижения целевых параметров нагрева является гетерогенность морфологии металлического лома. Вариативность гранулометрического состава, насыпной плотности, содержания органических загрязнений и влаги непосредственно определяет газопроницаемость слоя шихты, коэффициент межфазного теплообмена и, следовательно, равномерность прогрева по объему бадьи. В условиях работы традиционных алгоритмов АСУ ТП на жестких временных уставках разброс температуры по сечению шихты достигает $\Delta T$ 150 °C [7], что приводит к «закозлению» ванны ДСП холодными кусками крупногабаритного лома. Целью настоящего исследования является разработка методологии адаптивного управления режимами ВПШ в автономной бадье-термосе, основанной на комплексной оценке физико-химических свойств шихты методами инструментального экспресс-анализа и математического моделирования тепломассопереноса в пористой среде.

Энергобаланс дуговой сталеплавильной печи представлен на рис. 1.

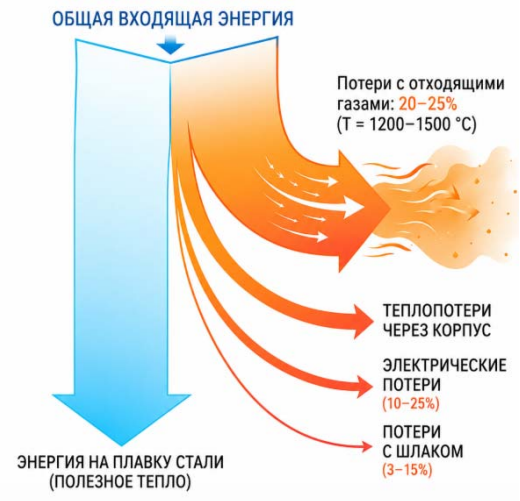



*Рис. 1*. Энергобаланс дуговой сталеплавильной печи

Существующие промышленные системы ВПШ подразделяются на две основные группы: установки, использующие тепло отходящих газов ДСП (шахтные печи Shaft EAF, системы непрерывного конвейерного подогрева типа Consteel), и автономные установки на природном газе (системы подогрева в бадьях) [4, 8]. Системы первой группы обеспечивают более высокие температуры подогрева (400–850 °C) при меньших затратах за счет утилизации вторичных энергоресурсов, однако требуют жесткой технологической синхронизации с режимом плавки, усложняют системы газоочистки и характеризуются значительными капитальными затратами и габаритами [8, 9].

Автономные бадьевые установки на природном газе сохраняют технологическую гибкость, допускают применение на предприятиях с любым плавильным агрегатом и обеспечивают термический КПД на уровне 70–85 % при использовании конструкции бадьи-термоса [9]. Применение специализированной бадьи-термоса с двойным корпусом (вставкой-обечайкой из конструкционной стали толщиной 6–10 мм с кольцевым зазором 50–100 мм, продуваемым холодным воздухом) полностью исключает конвективный теплообмен к несущему корпусу от высокотемпературных газов и вдвое снижает радиационный теплообмен, что позволяет нагревать шихту до 500–750 °C без угрозы деградации грузонесущих элементов [9, 10].

Для эффективного управления режимами предварительного подогрева шихты (ВПШ) критически важны три группы параметров:

1. Гранулометрический состав и плотность. Определяют пористость слоя (0,40–0,60), от которой зависит скорость потока теплоносителя. Смешанная загрузка (крупный лом и стружка) ведет к неравномерной проницаемости, образуя сквозные каналы продувки и «холодные карманы» с дефицитом температуры до 150 °С.

2. Влажность и органические загрязнения. Влага требует дополнительных энергозатрат на испарение. При 250–350 °С масла и СОЖ испаряются и пиролизуются. Их неконтролируемое горение вызывает локальные перегревы, взрывоопасность и перегрузку вытяжки, а при нагреве свыше 500–600 °С выделяются токсичные соединения.

3. Химический состав и окисляемость. Угар металла при ВПШ (550–600 °С) минимален (до 0,5 %) из-за высокой скорости нагрева и образования защитной оксидной пленки. Общий угар в связке «ВПШ–ДСП» (4–5 %) почти вдвое ниже, чем в дуговой печи без подогрева, благодаря сокращению времени окисления в зоне дуги.

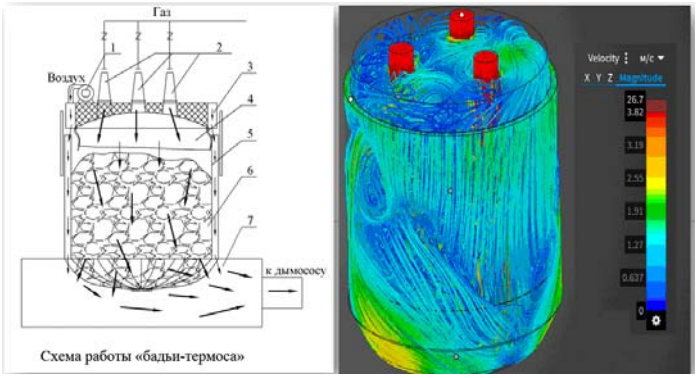
Для адаптивного управления ВПШ (см. таблицу) необходим отказ от долгих лабораторных тестов химического анализа (1–3 ч) в пользу экспресс-анализа на месте. Портативные анализаторы определяют состав за 30–90 с, но не идентифицируют легкие элементы (C, Si). Эту проблему решают лазерно-искровые спектрометры: они измеряют углерод (погрешность ± 0,05 %) за 5–15 с прямо на поверхности лома. Интеграция стационарных приборов в конвейеры для непрерывного потокового контроля позволяет формировать шихту заданного состава, снижая дисперсию углеродного эквивалента завалки с ± 0,08 до ± 0,03 %.

**Сравнение экспресс-методов для управления ВПШ**

| Метод | Определяемые параметры | Время | В потоке | Ограничения |
|---|---|---|---|---|
| Визуальный осмотр | Категория лома, засоренность | Непрерывно | Высокая | Субъективность, отсутствие точных цифр |
| Рентгенофлуоресцентные спектрометры (портативные) | Элементный состав (кроме C, Si, O) | 30–90 с | Средняя | Не определяет легкие элементы |
| Лазерно-искровые спектрометры (портативные) | Полный элементный состав (с C) | 5–15 с | Средняя | Требует чистой поверхности лома |
| Машинное зрение | Гранулометрия, насыпная плотность | 1–3 мин | Высокая | Чувствительность к освещению и пыли |
| ИК-термография | Влажность, температурное поле | Непрерывно | Высокая | Нет точной количественной оценки влаги |
| Лабораторный ОЭС | Точный химический состав | 20–60 мин | Низкая | Временная задержка не позволяет управлять ВПШ |

Верификация модели (рис. 2) выполнена на данных натурных испытаний опытно-промышленной установки с бадьей емкостью 6 т, оснащенной тремя инжекционными горелками суммарным расходом 270 м³/ч природного газа. Граничные усло-

вия: начальная температура шихты $T_0 = 20$ °С; температура продуктов сгорания на входе в слой – 950–1050 °С; порозность $\varepsilon = 0{,}44$ (типовая шихта из крупного лома); диаметр бадьи – 1,4 м; высота слоя 1,7 м [9, 10].




*а*) *б*)

*Рис. 2*. Конструктивно-технологическая схема стенда прецизионного подогрева шихты (*а*) и распределение векторов скоростей (CFD-моделирование) газового потока в объеме загрузочной корзины (*б*):
*1* – продувочный вентилятор; *2* – горелки; *3* – коллектор обдува; *4* – огнестойкая завеса; *5* – вставка: *6* – нагреваемая шахта; *7* – корпус стенда

Моделирование в ANSYS Discovery с использованием *k*–ε-модели турбулентности и пористого приближения показало, что при однородной порозности $\varepsilon = 0{,}44$ температурный перепад по высоте слоя через 25 мин нагрева составляет $\Delta T =$ 95–110 °С (максимум в нижней зоне, минимум в верхней). При смешанной шихте (50 % крупного лома + 50 % стружки) локальная порозность изменяется в диапазоне $\varepsilon =$ 0,35–0,58, что приводит к формированию каналов ускоренной продувки и росту $\Delta T$ до 145–160 °С [9]. Мгновенные скорости газового потока в каналах достигают 23–27 м/с при средней скорости фильтрации 3–4 м/с, что согласуется с результатами визуализации в ANSYS (рис. 2) Снижение удельного расхода электроэнергии на 28–33 кВт · ч/т непосредственно обусловлено ростом энтальпии шихты перед завалкой в ДСП. Теоретическая оценка: при нагреве стального лома от 20 до 485 °С прирост энтальпии $\Delta H = m\bar{c}\Delta T = 600 \cdot 0{,}55 \cdot 465 \approx 1{,}53$ ГДж (≈ 425 кВт · ч на одну бадью), что при КПД нагревательной установки η = 0,78 соответствует расходу природного газа ≈ 63 м$^3$ и потенциальной экономии электроэнергии в ДСП ≈ 355 кВт · ч (≈ 59 кВт · ч/т). Фактически достигнутая экономия 55–68 кВт · ч/т (с учетом сокращения tap-to-tap time и снижения расхода электродов) согласуется с термодинамическим потенциалом процесса и не противоречит законам сохранения энергии.

Литература

1. Лопухин, Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства / Г. А. Лопухин // Электрометаллургия. – 2000. – № 7. – С. 3–12.
2. Дюдкин, Д. А. Производство стали в дуговых печах / Д. А. Дюдкин, В. А. Кисиленко. – М. : Теплотехник, 2008. – 539 с.
3. Смирнов, А. Н. Энергосберегающие технологии подогрева и окислительного рафинирования лома в современных ДСП / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. Ю. Нуров [и др.] // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 25–29.

4. Совершенствование технологии подготовки и переработки стального лома / А. М. Поживанов, А. А. Зайцев, О. В. Кулагин, В. И. Матюхин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2011. – 352 с.
5. Григорян, В. А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. – 3-е изд. – М. : МИСиС, 2004. – 260 с.
6. Рощин, А. В. Влияние органических загрязнений шихты на экологические и технологические показатели работы установок предварительного подогрева лома / А. В. Рощин, В. Е. Рощин // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 10–14.
7. Тимофеев, В. Н. Анализ методов оценки качества металлического лома и их влияние на показатели плавки в ДСП / В. Н. Тимофеев, П. С. Гринберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 341–347.
8. Rummler, K. Scrap Preheating and Continuous Charging System / K. Rummler, A. Tunaboyl // MPT International. – 2011. – N 5. – P. 44–49.
9. Установки подогрева шихты для электроплавки / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 68–74.
10. Ровин, Л. Е. Интенсивные режимы нагрева шихты / Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 55–60.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ ГОРЕЛОК В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА БАЗЕ ЭКСПРЕСС-CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

**И. О. Вечерко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Выполнено параметрическое CFD-исследование восьми конфигураций стеновых газокислородных горелочных устройств (ГГУ) дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т в Ansys Discovery Live (GPU-ускоренный Lattice-Boltzmann-решатель). Варьировались угол наклона оси горелки α (10–45°) и положение ГГУ. Оптимальная конфигурация (α = 28°, смещение в «темные секторы») обеспечивает долю тепловой мощности, переданной шихте, $\eta_q$ = 61 %, площадь зоны переокисления $S_{\{O_2\}}$ = 0,02 м², коэффициент неравномерности температурного поля $K_T$ = 1,28. По сравнению с нерациональными схемами прогнозируется снижение угара металлошихты на 12–15 % и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т. Применение экспресс-CFD обеспечивает ускорение итерационного цикла проектирования до 20 раз относительно классического CFD.*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, газокислородная горелка, угар металла, CFD-моделирование, Ansys Discovery Live, газодинамика, переокисление ванны, темные секторы, тороидальное течение, удельный расход электроэнергии.

Электросталеплавильное производство обеспечивает свыше 28 % мирового выпуска стали; его доля устойчиво возрастает по мере роста ресурсной базы металлолома и развития возобновляемой генерации [1]. Стеновые газокислородные горелочные устройства (ГГУ) традиционно рассматриваются как один из наиболее экономически эффективных инструментов форсирования плавки: рациональное применение ГГУ снижает удельный расход электроэнергии на 20–45 кВт · ч/т и сокращает плавку на 4–8 мин [4, 5]. Вместе с тем нерациональная ориентация факела порождает противоположный эффект: кислородная струя, направленная на поверхность жидкой ванны, вызывает локальное переокисление металла и интенсивное образование FeO, увеличивая угар металлошихты на 0,5–1,5 % от общей массы плавки [5, 6].

Традиционные CFD-расчеты в программах класса Ansys Fluent требуют 4–8 ч машинного времени на GPU-кластере для одной геометрической конфигурации, что